Heiße Aussichten für Tieftemperatur-

Magnesiumdiborid widerspricht dem herkömmlichen Wissen über Supraleiter. Die Verbindung wird bei der relativ hohen Temperatur von 40 Kelvin supraleitend – was eine Reihe interessanter Anwendungen verspricht.

Von Paul C. Canfield und Sergey L. Bud'ko

Angenommen, Sie würden in Ihrem Garten, den Sie gut zu kennen meinen, unvermittelt eine Goldader entdecken. Ein ähnliches Goldrauschgefühl erfasste die Festkörperphysiker im Jahr 2001, als eine Forschungsgruppe verkündete, Magnesiumdiborid (MgB_2) könne bereits bei Temperaturen nahe 40 Kelvin widerstandsfrei elektrischen Strom leiten.

Diese einfache chemische Verbindung wird bereits seit einem halben Jahrhundert untersucht und in manchen Labors für Standardanwendungen eingesetzt – ohne dass jemand ihr enormes Potenzial erahnte. Wenngleich 40 Kelvin (also 40 Grad über dem absoluten Nullpunkt oder –233 Grad Celsius) ziemlich frostig klingen, ist dieser Wert doch fast doppelt so hoch wie der bisherige Rekord für metallische Supraleiter (rund 23 Kelvin für die in Forschung und Industrie häufig verwendeten Niob-Legierungen). Eine solch hohe Sprungtemperatur – die Temperatur, unterhalb derer ein Supraleiter elektrischen Strom verlustfrei leitet – lässt sich mit viel geringerem technischen Aufwand erreichen. Zu den potenziellen Anwendungen zählen supraleitende Magnete und Stromleitungen.

Im Gegensatz zu den Hochtemperatursupraleitern (Kupferoxid enthaltende Materialien, die schon bei Temperaturen unterhalb von 130 Kelvin supraleitend werden) ist MgB_2 eher ein herkömmlicher Supraleiter – allerdings eine neue Variante. Physiker hatten bei ihrer jahrzehntelangen Suche nach immer höheren Sprungtemperaturen Faustregeln für möglichst aussichtsreiche Elementkombinationen aufgestellt. Zudem vermuteten die meisten von ihnen, dass herkömmliche Supraleiter eine Sprungtemperatur von 23 Kelvin nicht nennenswert überschreiten könnten. Zu ihrer großen Überraschung widersprach MgB_2 diesen Regeln – und durchbrach die bisher vermutete Temperaturobergrenze.

Aufregung in der Physikergemeinde

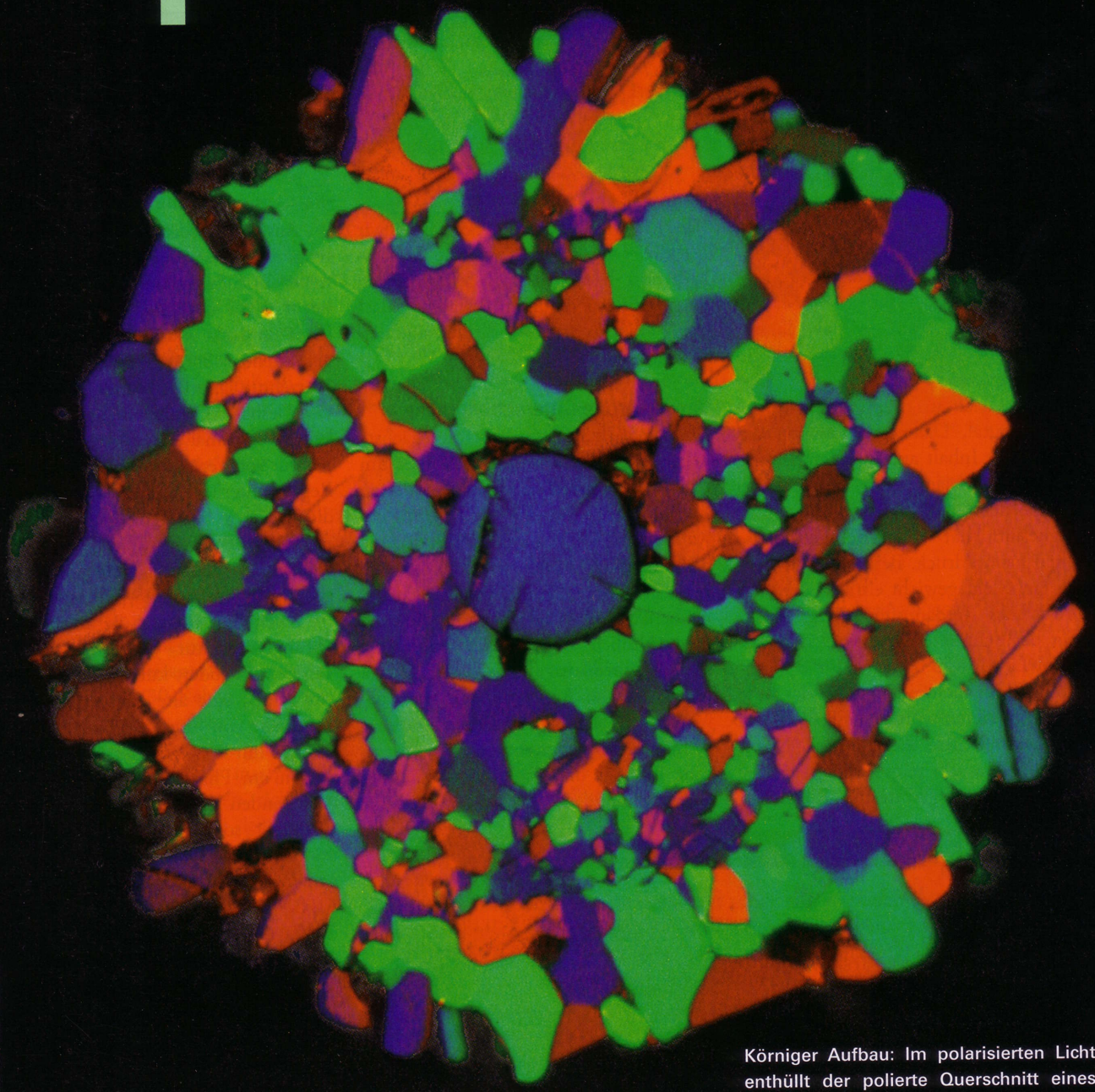
Erstaunlich schnell konnten die Supraleitungsforscher ihr Wissen um Magnesiumdiborid vertiefen. Mitte Januar 2001 hatte Jun Akimitsu von der Aoyama-Gakuin-Universität in Tokio die Entdeckung auf einer Konferenz vorgestellt. Bereits zwei Monate später wurden auf der Jahrestagung der American Physical Society rund hundert Zwei-Minuten-Vorträge zu diesem Thema gehalten, außerdem waren auf arxiv.org – einer Webseite für wissenschaftliche Veröffentlichungen – bereits 70 Forschungsarbeiten elektronisch erhältlich.

Für diesen ungewöhnlichen Aktivitätsschub gab es mehrere Gründe. Erstens ist es – wenn man herausgefunden hat, wie – recht einfach, relativ reines MgB_2 herzustellen. Zweitens profitierten die Festkörperphysiker von der schnellen Kommunikation über das Internet. Diese beiden Umstände, kombiniert mit der Aussicht auf einen neuen, einfach zu handhabenden Supraleiter mit hoher Sprungtemperatur, schlugen die Physikergemeinde in ihren Bann.

Zunächst breiteten sich Informationen über Akimitsus Entdeckung nur mündlich oder per E-Mail aus. Es gab weder eine wissenschaftliche Veröffentlichung noch ein elektronisch verfügbares Manuskript. Als unsere Gruppe wenige Tage nach der Konferenz davon hörte, stellten wir uns einige Fragen: Können wir eine hochreine feste Probe aus diesem Material herstellen? (Kommerziell erhältliches MgB_2 liegt als nicht besonders reines Pulver vor.) Wird es tatsächlich bei 40 Kelvin supraleitend? (Über zwei Jahrzehnte lang verfolgten uns immer wieder »USOs«, wie wir »unidentifizierbare supraleitende Objekte« scherzhaft abkürzten – Verbindungen, deren angeblich extrem hohe Sprungtemperatur von niemandem reproduziert werden konnte.) Können wir, falls MgB_2 tatsächlich ein Supraleiter ist, den ursächlichen Mechanismus ergründen? Und schließlich: Können wir einige grundlegende Eigenschaften dieser Verbindung beschreiben? Zu unser aller Glück ließen sich diese Fragen allesamt bejahen.

Die Gerüchte um Akimitsus Entdeckung markierten für uns und für andere Forschergruppen den Beginn einer be- ▷

Supraleiter



HAL SAILSBURY, MATERIALS PREPARATION CENTER, AMES LABORATORY

Körniger Aufbau: Im polarisierten Licht enthüllt der polierte Querschnitt eines 0,14 Millimeter dicken Drahts aus Magnesiumdiborid, dass das Material aus dicht gepackten, regellos angeordneten Körnern besteht. Solche Drähte werden in der Grundlagenforschung verwendet, um die Supraleitungseigenschaften dieser Verbindung zu untersuchen.

▷ triebsamen, wundervollen Zeit. Unser Team ist darauf spezialisiert, die physikalischen Eigenschaften metallischer Verbindungen zu untersuchen. Als wir von den neuen Befunden hörten, nahmen wir sofort unsere bisherigen Materialien aus den Öfen und begannen, MgB_2 herzustellen.

Anfangs war das gar nicht so einfach. Magnesiumdiborid ist eine so genannte intermetallische Verbindung – eine, die zwei oder mehr leitende Bestandteile enthält. Die einfachste Methode zu deren Herstellung – das gemeinsame Schmelzen beider Elemente – erwies sich wegen der stark unterschiedlichen Schmelzpunkte als nicht praktikabel: Magnesium schmilzt bei 650, Bor erst bei über 2000 Grad Celsius. Da Magnesium bei knapp über 1100 Grad Celsius bereits zu sieden beginnt, verflüchtigt es sich, bevor es eine Verbindung mit Bor eingehen kann.

Doch die Verdampfung des Magnesiums macht eine andere Herstellungsmethode möglich: Wir versiegelten ein Stück Magnesium und etwas Borpulver in einem Gefäß aus dem reaktionsträgen Metall Tantal. Dann erhitzten wir das Gefäß samt Inhalt auf eine Temperatur, bei der das Magnesium gerade noch nicht siedet (rund 950 Grad Celsius). Magnesium hat einen vergleichsweise hohen Dampfdruck. Bei 950 Grad stellt sich ein Gleichgewicht ein, bei dem der Druck des verdampften Magnesiums über der Schmelze ein Drittel des normalen Luftdrucks beträgt. Wir erwarteten, dass der dichte Dampf in das feste Bor diffundieren würde. Tatsächlich bildete sich auf diese Weise innerhalb von zwei Stunden sehr reines MgB_2 – in der Form von lose gesinterten Kügelchen (ähnlich wie Sandstein). So hatten wir nur drei Tage, nachdem wir die Gerüchte gehört hatten, selbst die Kügelchen hergestellt und konnten bestätigen, dass die Verbindung bei 40 Kelvin supraleitend wird.

Verräterische Gitterschwingungen

Danach beschäftigte uns die nächste brennende Frage: Handelte es sich um einen herkömmlichen Supraleiter, dessen Funktion sich mit der seit Langem bewährten BCS-Theorie erklären lässt, die nach ihren Begründern John Bardeen, Leon N. Cooper und J. Robert Schrieffer benannt ist? Falls ja, dann wäre die ungewöhnlich hohe Sprungtemperatur erklärungsbedürftig, aber das Potenzial für technische Anwendungen wäre gewaltig. Falls sich ein exotischerer Mechanismus dahinter verbergen würde, so wäre dies für die Grundlagenforschung eine bedeutende Entdeckung.

Aus verschiedenen Gründen vermuteten einige Forscher, MgB_2 sei kein normaler BCS-Supraleiter. Erstens lagen – bevor 1986 die Hochtemperatursupraleiter entdeckt wurden – die höchsten gefundenen Sprungtemperaturen zwei Jahrzehnte lang bei Werten um 20 Kelvin. Deshalb vermuteten einige Theoretiker, die maximal erreichbare Sprungtemperatur von Verbindungen, die den BCS-Regeln unterliegen, könne höchstens um die 30 Kelvin betragen. Zwar übertreffen die Hochtemperatursupraleiter auf Kupferoxid-Basis diesen Wert deutlich, doch gelten sie nicht als BCS-Typ.

Zweitens verletzte die relativ hohe Sprungtemperatur (auch als kritische Temperatur oder kurz T_c bezeichnet) von MgB_2 eine alte Faustregel, die für die Suche von intermetallischen Verbindungen mit hoher T_c galt: Je mehr Elektronen am Phasenübergang in den supraleitenden Zustand beteiligt sind, desto höher sollte die Sprungtemperatur sein. Weder Magnesium noch Bor bringen besonders viele Elektronen in die MgB_2-Verbindung ein.

Es gibt einen einfachen Test dafür, ob ein Supraleiter in die Klasse der BCS-Typen gehört. Eine Schlüsselrolle in der BCS-Theorie spielen nämlich die so genannten Gitterschwingungen; je höher deren Frequenz, desto höher sollte die Sprungtemperatur des Supraleiters sein. Die Schwingungen lassen sich durch ein mechanisches Modell verdeutlichen, in dem man sich die chemischen Bindungen zwischen den Atomen eines Kristallgitters durch starke Spiralfedern ersetzt denkt. Eine äußere Anregung wie beispielsweise Energiezufuhr durch Erhit-

IN KÜRZE

- Im Jahr 2001 entdeckten japanische Wissenschaftler, dass die an sich recht unscheinbare Verbindung **Magnesiumdiborid** bei Temperaturen unterhalb von etwa 40 Kelvin elektrischen Strom verlustfrei leitet. Diese Sprungtemperatur ist rund doppelt so hoch wie die anderer verwandter Supraleiter.
- Für **praktische Anwendungen** muss die Verbindung auf 20 bis 30 Kelvin gekühlt werden. Das ist mit flüssigem Neon oder Wasserstoff als Kühlmittel oder mit Kältemaschinen möglich – und somit billiger und weniger störanfällig als die Kühlung mit flüssigem Helium auf rund 4 Kelvin, die für die derzeit gebräuchlichsten Supraleiter aus Niob-Legierungen erforderlich ist.
- Durch gezielten Einbau von Kohlenstoff oder anderen Elementen in das Kristallgitter von Magnesiumdiborid erreichen oder übertreffen die **Supraleitfähigkeitseigenschaften** dieser Verbindung diejenigen von Niob-Legierungen. Zu möglichen Anwendungen zählen supraleitende Magnete, Hochspannungsleitungen und hochempfindliche Detektoren für magnetische Felder.

zen bewirkt, dass die einzelnen Atome mit einer charakteristischen Frequenz zu schwingen beginnen. Wie für makroskopische Gegenstände gilt auch im Kristall: Die charakteristische Frequenz ist umso niedriger, je größer die Masse der schwingenden Atome ist. Indem wir unterschiedliche Magnesium- oder Bor-Isotope verwenden, können wir die Masse der schwingenden Atome im MgB_2-Kristallgitter gezielt beeinflussen. Dadurch verändert sich die Schwingungsfrequenz und in deren Folge auch T_c.

Bor hat zwei stabile, natürlich vorkommende Isotope: Bor-10 und Bor-11. Gemäß der BCS-Theorie sollte die Sprungtemperatur zweier MgB_2-Proben, die aus Bor-10 beziehungsweise Bor-11 hergestellt wurden, um 0,85 Kelvin differieren, sofern keine Sondereffekte zu berücksichtigen sind. Mit unseren ersten gesinterten MgB_2-Kügelchen maßen wir einen Temperaturunterschied von einem Kelvin. Dass dies geringfügig höher war als erwartet, hängt offenbar damit zusammen, dass die Schwingungen der Boratome einen höheren Einfluss auf die Supraleitereigenschaft haben als diejenigen der Magnesiumatome (siehe Kasten auf S. 64).

Verlustfreie Überlandleitungen?

Unser Befund legte den Schluss nahe, dass MgB_2 höchstwahrscheinlich ein BCS-Supraleiter ist – allerdings einer mit extrem hoher Sprungtemperatur. Demnach war die Vorhersage der Theoretiker, wonach bei etwa 30 Kelvin eine Obergrenze erreicht sei, offenbar unzutreffend. Dies war durchaus eine gute Nachricht: Denn gewöhnliche intermetallische BCS-Supraleiter lassen sich weit einfacher handhaben und leichter zu brauchbaren Drähten verarbeiten als Supraleiter auf Kupferoxid-Basis.

Uns kam in der Tat plötzlich die Idee, MgB_2-Drähte einfach dadurch herzustellen, dass wir Borfäden Magnesiumdampf aussetzen (siehe Kasten rechts). Solche Drähte sind meist nützlicher als gesinterte Kügelchen – für Laborexperimente ebenso wie für praktische Anwendungen wie etwa als Magnete.

Auch wenn Supraleitung nur bei sehr niedrigen Temperaturen auftritt, hat sie bereits heute vielfältigen praktischen Nutzen. Ihr offenkundigster Vorzug ist, dass hohe elektrische Ströme ohne jegliche Verluste fließen und sich infolgedessen das Leitungsmaterial nicht erhitzt. Ein Anwendungsbeispiel sind supraleitende Elektromagneten, die Feldstärken bis über 20 Tesla erreichen können (rund 500-mal stärker als ein handelsüblicher Magnet zum Anheften von Notizen). Derartige Magnete (aber auch schwächere) werden in Teilchenbeschleunigern, Forschungslabors und Computertomografen eingesetzt. Die Verkaufszahlen für solche Magnete, die aus Niob-Verbindungen und -Legierungen hergestellt werden, steigen kontinuierlich.

Ein weitere potenzielle Anwendung sind verlustfreie Überlandleitungen aus Supraleitern, die viel höhere Stromdichten erlauben als herkömmliche Leitungen. Bislang haben Forscher erfolgreich einige Prototypen aus Kupferoxid-Supraleitern getestet, die mit flüssigem Stickstoff auf 77 Kelvin gekühlt wurden. ▷

Herstellung von MgB_2-Drähten

Nur wenige Wochen nach der Entdeckung von Supraleitung in Magnesiumdiborid (MgB_2) entwickelten wir ein Verfahren für die Herstellung von Drähten aus dem Erfolg versprechenden Material. Wir ließen dazu Magnesiumdampf mit festem Bor reagieren – ein Prozess, der bei Temperaturen nahe 1000 Grad Celsius innerhalb einiger Stunden abläuft. Dabei diffundiert das Magnesium in das Bor hinein und wandelt es in MgB_2 um (wobei dieses stark aufquillt). Der Vorgang ist vergleichbar mit einem trockenen Schwamm, der sich an einem feuchten Tag mit Wasserdampf vollsaugt. Die Reaktion gelingt auch mit Borfasern, die in Längen von einigen hundert Metern erhältlich sind; der Ausgangsdurchmesser betrug in unseren Versuchen zwischen 0,1 und 0,3 Millimeter.

Die auf diese Weise hergestellten Drähte eignen sich hervorragend für die Grundlagenforschung. Mit ihnen können die physikalischen Eigenschaften von MgB_2 untersucht werden. Bevor solche Drähte praktisch eingesetzt werden können, müssen sie mit einem leitfähigen, dehnbaren Mantel versehen werden, der ihre mechanische Belastbarkeit erhöht. (Der leitfähige Mantel kann zudem für den Fall, dass der Supraleiter versagt, weiterhin Strom transportieren, was eine Überhitzung und Zerstörung des MgB_2 vermeidet.) Bislang allerdings wurde noch kein geeigneter Mantel entwickelt.

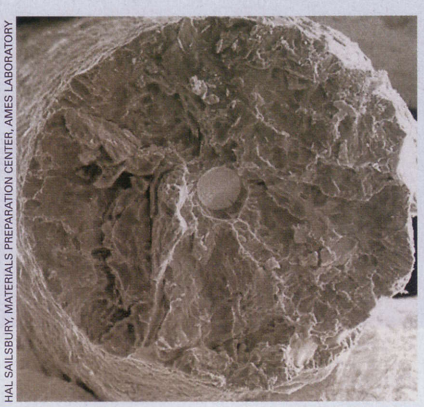
In einem geläufigeren Verfahren füllt man Magnesium- und Borpulver oder pulverförmiges MgB_2 in ein Röhrchen. Dieses wird dann zu einem Draht ausgezogen und so behandelt, dass festes Magnesiumdiborid entsteht. Mit dieser Technik wurden Labormuster von Drähten in einer Länge zwischen einigen Dutzend und einigen hundert Metern hergestellt.

Wenngleich MgB_2 erst seit Kurzem als Supraleiter bekannt ist, arbeiten Firmen bereits an einer Kommerzialisierung des Materials.

NORMAN E. ANDERSON, JR.

Dünne Drähte lassen sich durch Einwirken von Magnesiumdampf auf Borfasern herstellen.

Aufgeschnitten enthüllt der Magnesiumdiborid-Draht einen zentralen Kern aus Wolframborid mit 0,015 Millimeter Durchmesser.



HAL SAILSBURY, MATERIALS PREPARATION CENTER, AMES LABORATORY

Geschichte der Supraleitung

Der Niederländer Heike Kamerlingh Onnes entdeckte 1911 das Phänomen der Supraleitung, als er die elektrischen Eigenschaften von Metallen bei tiefen Temperaturen untersuchte. Als er Quecksilber mit flüssigem Helium auf 4,2 Kelvin abkühlte, verlor es unvermittelt seinen elektrischen Widerstand. Die Temperatur, bei der dieser Übergang vom normalen zum idealen Leiter auftritt, nennen die Physiker Sprungtemperatur oder kritische Temperatur (abgekürzt T_c).

Im Lauf der folgenden fünfzig Jahre wurden weitere supraleitende Materialien mit immer höherer kritischer Temperatur entdeckt. Alle diese Supraleiter waren entweder reine Metalle oder intermetallische Verbindungen (die aus zwei oder mehr metallischen Elementen bestehen). Doch seit den 1960er Jahren gelang es trotz intensiver Forschungen nicht, die Obergrenze für T_c über den bereits erreichten Wert von etwa 23 Kelvin hinauszutreiben.

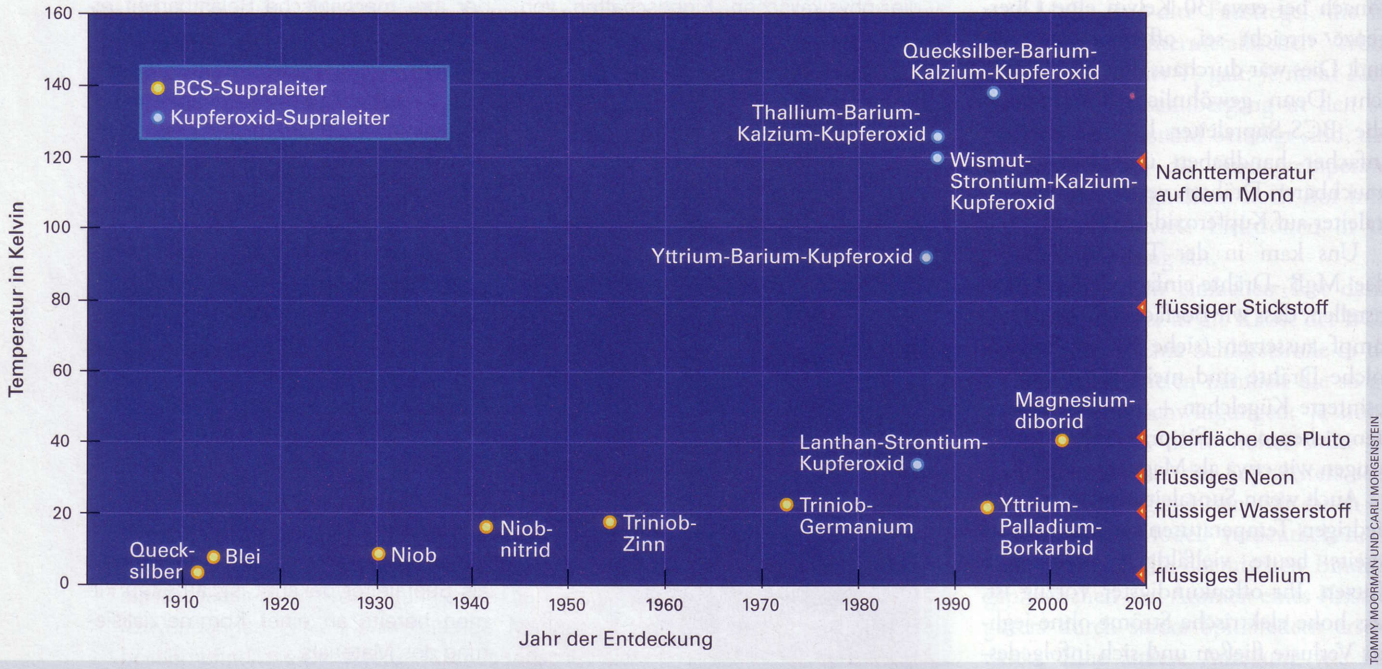
Dies änderte sich 1986 schlagartig mit der Entdeckung der Hochtemperatursupraleiter durch Johannes Georg Bednorz und Karl Alex Müller am IBM-Forschungszentrum in Rüschlikon (Zürich). Auch für diese Kupferoxid-Verbindungen schossen die erreichten Werte für T_c immer weiter nach oben; Quecksilber-Barium-Kalzium-Kupferoxide erreichten sogar eine Sprungtemperatur von etwa 130 Kelvin. Dies war für Forscher eine faszinierende Zeit. Ihnen wurde schnell klar, dass die bisherige Theorie der Supraleitung – die so genannte BCS-Theorie (siehe Kasten auf S. 62) – nicht geeignet war, den Widerstandsverlust in diesen neuen Materialien zu erklären. Obwohl Physiker sich die letzten zwanzig Jahre eingehend damit befassten, steht eine überzeugende Theorie, wie und warum Kupferoxide Strom widerstandsfrei leiten, bis heute aus.

Diese Verbindungen stellen auch werkstofftechnisch eine Herausforderung dar. Anfangs war es sehr schwierig, sie hochrein oder als Einkristall herzustellen, was die Beschreibung ihrer grundlegenden Eigenschaften erschwerte. Zudem war es nicht leicht, sie zu Drähten zu verarbeiten: Im Gegensatz zu intermetallischen Supraleitern müssen die einzelnen Körner, aus denen diese Oxide bestehen, in bestimmter Richtung zueinander ausgerichtet sein, damit der Draht technisch verwendbar ist. Wegen dieser Probleme wünschten sich Forscher und Ingenieure ein Material, das ähnlich einfach zu handhaben ist wie die intermetallischen Supraleiter, zugleich aber eine kritische Temperatur oberhalb von 20 Kelvin aufweist.

Zu Beginn des neuen Jahrtausends waren – je nach technischem und finanziellem Aufwand – unterschiedliche Supraleiter verfügbar. Mit den Oxiden ließen sich bereits durch Kühlung mit flüssigem Stickstoff, das bei 77 Kelvin siedet, Supraleiter in der Praxis einsetzen. Die älteren intermetallischen Verbindungen wie Triniob-Zinn wurden in Labors und für Magnete in medizinischen Geräten verwendet; sie benötigen Arbeitstemperaturen von 4 Kelvin, die durch aufwändige Kühlung mit flüssigem Helium erreicht wird.

Darum war die Entdeckung der Supraleitung in Magnesiumdiborid im Jahr 2001 genau das, was allen fehlte: Das Material zählt zu den einfach zu handhabenden intermetallischen Verbindungen, hat aber eine kritische Temperatur von knapp 40 Kelvin – rund doppelt so hoch wie die bisheriger intermetallischer Supraleiter.

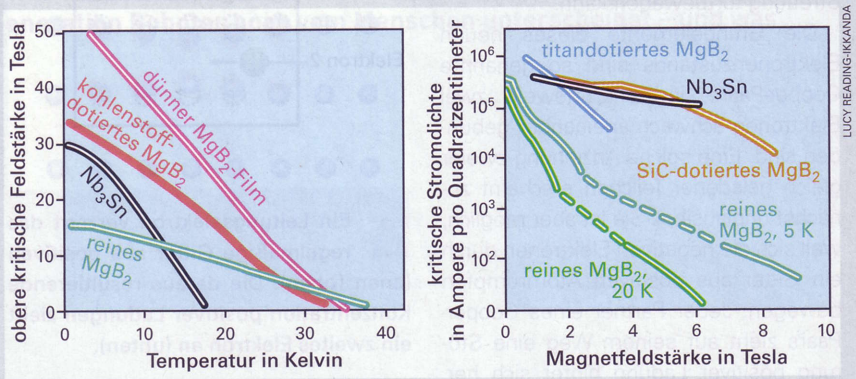
Supraleiter im Lauf der Jahrzehnte



TOMMY MOORMAN UND CARLI MORGENSTEIN

Verbesserte Performance

Für den praktischen Einsatz ist es besonders wichtig, dass die Supraleitung auch in äußeren Magnetfeldern und bei starkem Stromfluss erhalten bleibt. Die Kurven in den beiden Diagrammen zeigen, wie das gezielte Hinzufügen von Fremdatomen – eine so genannte Dotierung – die Eigenschaften von MgB_2 verbessern konnte. Inzwischen übertrifft dieses Material teilweise die Eigenschaften des industriell häufig verwendeten Triniob-Zinn (Nb_3Sn). Die Kurvenverläufe links zeigen, dass Drähte aus kohlenstoffdotiertem MgB_2 und ein dünner Film aus MgB_2 mit unbekannten Zusätzen bei allen untersuchten Temperaturen einem hohen Magnetfeld (kritische obere Feldstärke) besser standhalten als Nb_3Sn. Die rechten Graphen (erstellt für 4 Kelvin, sofern nicht anders gekennzeichnet) zeigen, dass siliziumkarbiddotiertes MgB_2 ähnliche Stromleitungseigenschaften aufweist wie Nb_3Sn, während andere Eigenschaften geringfügig schlechter ausfallen. Gepunktete Linien stehen für Interpolationen.



Für den technischen Einsatz muss ein Supraleiter im Allgemeinen deutlich unter die Sprungtemperatur abgekühlt werden – auf Werte zwischen dem 0,5- und dem 0,7fachen von T_c. Denn je näher die Betriebstemperatur an T_c liegt, desto größer ist die Gefahr, dass die Supraleitung durch hohe Ströme oder starke Magnetfelder zerstört wird. Demnach sollte ein Material, dessen Sprungtemperatur 20 Kelvin beträgt, bei einer Temperatur von ungefähr 10 Kelvin betrieben werden. Für die Kühlung käme somit nur flüssiges Helium in Frage – was nicht nur kostspielig, sondern auch äußerst aufwändig wäre.

Anwendungsorientierte Forscher interessieren sich vor allem deshalb für Magnesiumdiborid, weil es einfacher auf eine verträgliche Betriebstemperatur gekühlt werden kann als die heute verwendeten Niob-Legierungen und -Verbindungen, die eine niedrigere Sprungtemperatur aufweisen. Als Kühlmittel für MgB_2 eignen sich flüssiger Wasserstoff oder flüssiges Neon; auch sind Kälteanlagen mit geschlossenem Kühlkreislauf, die leicht Temperaturen unter 20 Kelvin erreichen, zu einem erschwinglichen Preis erhältlich.

Doch um diese Vision zu verwirklichen, muss MgB_2 gute Supraleitereigenschaften aufweisen. Forscher achten vor allem auf die Mischphase eines Supraleiters, bei der ein äußeres Magnetfeld die Supraleitereigenschaft teilweise eliminiert. In den meisten Alltagsanwendungen wird sich das Material in dieser Phase befinden. Schwache Magnetfelder reichen nicht aus, um die Mischphase zu erzeugen – sie dringen nicht ins Innere des Supraleiters ein, sodass er supraleitend bleibt. Magnetfelder mittlerer Stärke hingegen können in den Supraleiter eindringen: Sie bilden feine »Schläuche« im magnetischen Fluss, so genannte Wirbel. Das Innere dieser Flussschläuche ist normalleitend, außerhalb von ihnen bleibt das Material jedoch supraleitend.

In dieser Mischphase weisen Supraleiter immer noch viele ihrer nützlichen Eigenschaften auf. Doch je stärker das äußere Magnetfeld wird, desto höher wird der prozentuale Anteil des durch die Flussschläuche in seiner Supraleitung beeinträchtigten Materials – bis zu dem Punkt, an dem sie sich komplett überlagern: Erfüllen die Flussschläuche den gesamten Supraleiter, so verliert er seine Supraleitfähigkeit. Die Feldstärke, bei der dies eintritt, wird als obere kritische Feldstärke bezeichnet. Sie ist ein Maß dafür, welchen praktischen Nutzwert ein Supraleiter hat.

»Eine fantastische Verbesserung«

Im technischen Einsatz sind Supraleiter zumeist mittelstarken Magnetfeldern ausgesetzt (das Magnetfeld reicht aus, um seine Funktion zu erfüllen, aber es eliminiert die Supraleitfähigkeit nicht). Das Ziel besteht also darin, die Bandbreite von Temperaturen und Feldstärken, innerhalb derer der Supraleiter in der Mischphase verbleibt, zu maximieren. Temperaturen spielen bei diesen Betrachtungen ebenfalls eine Rolle, weil die obere kritische Feldstärke eines Supraleiters von der Temperatur abhängig ist. Knapp unterhalb T_c liegt die obere kritische Feldstärke fast bei null. Das bedeutet, dass schon kleinste äußere Magnetfelder die Supraleitereigenschaft eliminieren können. Bei tieferen Temperaturen hingegen hält der Supraleiter auch stärkeren Störfeldern stand (siehe Kasten oben).

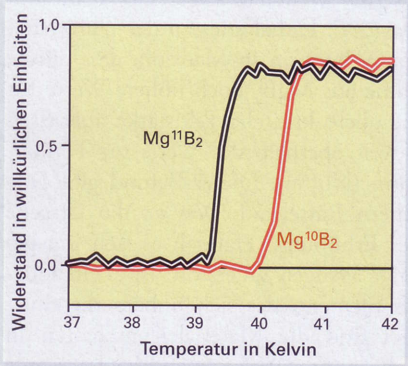
Zum Glück lässt sich die obere kritische Feldstärke eines supraleitenden Materials in gewissen Grenzen beeinflussen – vorzugsweise durch gezielte Zugabe von Fremdatomen. Wird beispielsweise etwas Bor durch Kohlenstoff ersetzt, steigt die obere kritische Feldstärke deutlich. Unser Team und andere Forschergruppen konnten zeigen, dass sich bei einer fünfprozentigen Kohlenstoffsubstitution die obere kritische Feldstärke von MgB_2 mehr als verdoppelt – eine fantastische und bedeutende Verbesserung.

Des Weiteren zeigte ein Team um David C. Larbalestier an der Universität von Wisconsin in Madison, dass dünne Filme aus MgB_2 noch höhere Werte für die obere kritische Feldstärke aufweisen – weit oberhalb des Werts für Triniob-Zinn (Nb_3Sn). Dieser Befund gibt Forschern Rätsel auf: Was ist die Ursache der Erhöhung? Handelt es sich um geringe Mengen Sauerstoff? Ist es ein anderes Element, das sich unbemerkt einlagert und die Materialeigenschaften in unbekannter Weise verändert? Ist es eine Dehnung der MgB_2-Struktur in den Filmen? Wie auch immer: Bereits jetzt ist klar, dass MgB_2 ein aussichtsreiches Material für die Herstellung von supraleitenden Magneten ist. Es verrichtet sei-

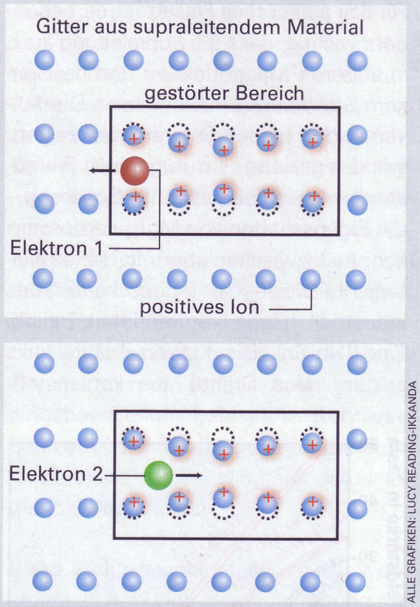
Die BCS-Theorie

Im Jahr 1957 präsentierten die Physiker John Bardeen, Leon N. Cooper und J. Robert Schrieffer eine Erklärung für die Supraleitung in Metallen – eine Theorie, die nach den Anfangsbuchstaben ihrer Namen benannt wurde. In normalleitenden Metallen werden Elektronen an Defekten oder Störstellen gestreut, was den elektrischen Widerstand hervorruft. Geht ein Material in den supraleitenden Zustand über, koppeln sich die Elektronen gemäß der BCS-Theorie zu einem Kollektiv zusammen, das sich ohne Streuung fortbewegen kann.

Die Grundelemente dieses neuen Elektronenzustands sind so genannte Cooper-Paare, in denen jeweils zwei Elektronen schwach aneinander gebunden sind. Eine solche Anziehung zweier gleich geladener Teilchen erscheint zunächst unplausibel. Sie ist aber möglich, weil sich die negativen Elektronen durch ein Gitter aus positiven Atomrümpfen bewegen. Jeder Partner eines Cooper-Paars zieht auf seinem Weg eine Störung positiver Ladung hinter sich her, durch die ein zweites Elektron angezogen wird (Bild rechts). Auf diese Weise bindet die Gitterverzerrung beide Elektronen locker aneinander. (Genauer gesagt sind Gitterschwingungen bestimmter Frequenz an dieser Bindung beteiligt.) Eine grobe Analogie sind zwei Kinder, die auf einem großen Trampolin springen. Obwohl zwischen beiden Kindern keine Anziehung besteht, kommen sie sich tendenziell näher – eine Folge der Verzerrung, die das jeweils andere Kind in der Trampolin-Bespannung erzeugt.



Isotopeneffekt: Der Wert der kritischen Temperatur von MgB_2 hängt davon ab, ob es mit dem Isotop Bor-10 oder Bor-11 hergestellt wurde.



ALLE GRAFIKEN: LUCY READING-IKKANDA

Ein Leitungselektron verzerrt das regelmäßige Gitter aus positiven Ionen (oben). Die daraus resultierende Konzentration positiver Ladungen zieht ein zweites Elektron an (unten).

Die einzelnen Cooper-Paare überlagern sich, und unterhalb der kritischen Temperatur T_c nehmen sie einen ausgedehnten elektronischen Zustand an, bei dem keinerlei elektrischer Widerstand mehr auftritt.

Einer vereinfachten Version der BCS-Theorie zufolge bestimmen drei Eigenschaften eines Materials den Wert von T_c: Die kritische Temperatur ist umso höher,

- je mehr Elektronen am supraleitenden Zustand beteiligt sein können,
- je höher die charakteristische Frequenz der Gitterschwingungen ist, die an der Kopplung der Elektronen in Cooper-Paaren mitwirken, und
- je stärker die Kopplung zwischen den Gitterverzerrungen und den Elektronen ist.

Jahrzehntelang war die Suche nach höheren T_c-Werten davon bestimmt, diese drei voneinander abhängigen Parameter zu optimieren – mit einer besonderen Präferenz für die beiden ersten. MgB_2 scheint indes wegen seiner stärkeren Elektron-Gitter-Kopplung – der dritten dieser Eigenschaften – einen höheren T_c-Wert aufzuweisen.

▷ nen Dienst bei höheren Temperaturen und möglicherweise sogar bei höheren äußeren Feldstärken als Triniob-Zinn – die derzeit bevorzugt in solchen Magneten verwendete Verbindung.

Aus Sicht der angewandten Physik ist die zweitwichtigste Eigenschaft von Supraleitern die kritische Stromdichte. Sie kennzeichnet den maximalen Strom, der durch einen Supraleiter fließen kann, ohne dass dieser seine widerstandslose Stromleitung verliert. Steigt die Stromdichte über den kritischen Wert, beginnen die Wirbel (also jene kleinen, nicht supraleitenden Regionen im Supraleiter) sich zu verschieben oder zu bewegen. Daraus resultiert ein Energieverlust – der elektrische Widerstand ist größer als null.

Um diesem Effekt entgegenzuwirken, können die Wirbel durch gezieltes Einbringen von Gitterdefekten festgehalten werden. Indem man die einzelnen Kristallite (oder Körner) des Supraleiters bei dessen Herstellung verkleinert, lässt sich ein solches Wirbel-Pinning (nach dem englischen Wort für Festnageln) oft unterstützen. Denn je kleiner die Kristallite, desto größer ist die Oberfläche an den Korngrenzen, an denen die Wirbel festgehalten werden. Eine weitere Methode zur Verbesserung des Wirbel-Pinnings besteht darin, winzige Einschlüsse von Materialien wie Yttriumoxid oder Titandiborid in den Supraleiter einzubringen.

Rohre für flüssigen Wasserstoff

Eine der größten Hürden, die der Anwendung von MgB_2 entgegensteht, ist die noch zu geringe kritische Stromdichte in starken Magnetfeldern. In schwachen Feldern gleicht die kritische Stromdichte zwar derjenigen von Triniob-Zinn, doch im Vergleich zu diesem Material fällt ihr Wert mit wachsender Feldstärke deutlich schneller ab. Das ist ein klarer Nachteil für den Einsatz in starken Magneten.

Andererseits haben die diversen Forschungsaktivitäten in den vier Jahren, die seit Entdeckung der Supraleitfähigkeit von MgB_2 verstrichen sind, die kritische Stromdichte bereits deutlich erhöhen können – nicht nur in schwachen Magnetfeldern, sondern insbesondere auch im Hochfeldregime. Weitere Fortschritte sind zu erwarten, wenn die Physiker ein tieferes Verständnis für die Vorgänge beim Wirbel-Pinning in MgB_2 entwickeln. ▷

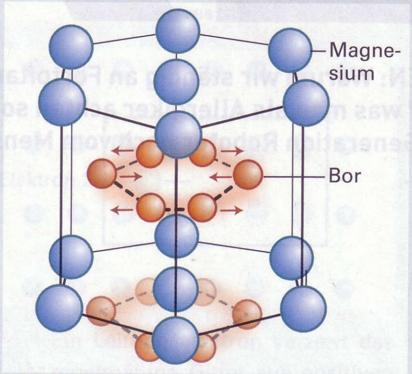
Struktur und Bindungen

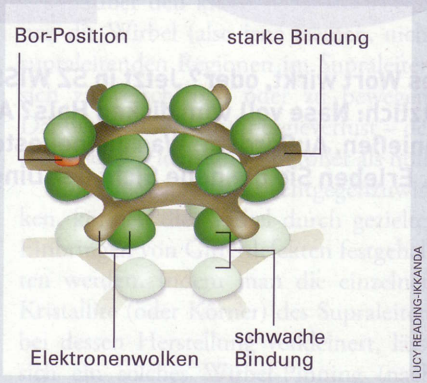
Einer der Hauptgründe für die überraschend hohe Sprungtemperatur von MgB_2 ist die Stärke der Wechselwirkung zwischen bestimmten Elektronen und bestimmten Gitterschwingungen. Diese starke Wechselwirkung ist auf die Struktur und die Bindungen des Materials zurückzuführen.

Die Boratome im MgB_2 sind in Form einer sechseckigen Honigwabe angeordnet (rechts, rot) und durch Schichten aus Magnesiumatomen (blau) voneinander getrennt. Die Elektronen, die sowohl für die gewöhnliche Leitfähigkeit als auch für die Supraleitung verantwortlich sind, finden sich in den Borschichten – sie sind bei einer der zwei möglichen Bindungen des Materials beteiligt (ganz rechts). Eine sehr starke Bindung besteht innerhalb der Sechseckebene – und eine viel schwächere zwischen den Borschichten.

Die Leitungselektronen der ebenen Bindungen werden von Gitterschwingungen innerhalb der Ebene erheblich beeinflusst (rote Pfeile). Diese starke Wechselwirkung oder Kopplung führt zu einem Zustand, der Supraleitung bei recht hohen Temperaturen ermöglicht.

MgB_2 hat eine sehr interessante physikalische Grundsatzdiskussion wiederbelebt: Kann die Supraleitung auf zwei unterschiedliche Gruppen von Elektronen (grüne und goldene Elektronenwolken) im Material zurückzuführen sein, die zwei verschiedene Kollektive aus Cooper-Paaren bilden? Die bisherigen experimentellen Befunde weisen darauf hin, dass MgB_2 das erste Beispiel für dieses Phänomen ist.





▷ Die Entdeckung der Supraleitfähigkeit von MgB_2 ist einerseits das Ergebnis jahrzehntelanger gezielter Forschung in diesem Bereich. Andererseits führt sie vor Augen, dass die Natur nicht unseren unzulänglichen Beschreibungsversuchen zu gehorchen braucht. Obwohl MgB_2 als chemische Verbindung bereits seit über 50 Jahren bekannt ist, wurde das Material erst jetzt auf supraleitende Eigenschaften hin getestet. Dies ist teils darauf zurückzuführen, dass MgB_2 nicht in unser Bild von Kandidaten für intermetallische Supraleiter passte. Zum Glück hat die Natur gelegentlich wohlmeinende Überraschungen für uns parat.

In den vergangenen vier Jahren hat sich unser Verständnis der Supraleitereigenschaften von MgB_2 drastisch und erstaunlich schnell erhöht. Wir haben klare Vorstellungen der Eigenschaften von hochreinem MgB_2, und wir lernten, wie wir das Material verändern müssen, um es gegen Magnetfelder resistenter zu machen und seine kritische Stromdichte zu erhöhen – was den Nutzwert steigert. Seine Eigenschaften bei 20 bis 30 Kelvin konnten so weit verbessert werden, dass Starkstromanwendungen – etwa Magnete – mit Kühlmitteln wie flüssigem Wasserstoff, flüssigem Neon oder mit den gängigen Kälteanlagen realisierbar scheinen. Prototypen supraleitender Drähte und sogar einige Magnete konnten bereits im Labor gefertigt werden. Aber es ist noch viel Arbeit nötig, um den Supraleiter zu optimieren, seine materialspezifischen Eigenschaften zu verstehen und die Herstellungstechnik besser in den Griff zu bekommen.

Insgesamt sieht die Zukunft für MgB_2 recht viel versprechend aus – insbesondere dann, wenn eines Tages Wasserstoff in unserer Energieversorgung eine größere Rolle spielen sollte. Die großen Mengen Wasserstoff müssten irgendwie transportiert werden. Eine Möglichkeit wären wärmeisolierte Rohrleitungen, durch die flüssiger Wasserstoff bei Temperaturen unterhalb seines Siedepunkts von 20 Kelvin gepumpt wird. Diese Rohre könnten zugleich als Kühlsystem für verlustfrei leitende Stromkabel aus MgB_2 fungieren. Wenngleich ein solches System zurzeit eher nach Sciencefiction klingt, gibt es bereits Vorschläge für Machbarkeitsstudien.

Nach der Entdeckung des ersten Kupferoxid-Supraleiters fanden Forscher Unmengen anderer supraleitender Kupferoxid-Varianten. Beim MgB_2 hingegen sieht es anders aus: In den vier Jahren seit seiner Entdeckung als Supraleiter konnten keine verwandten Verbindungen mit ähnlich hohen T_c-Werten gefunden werden. Die Entdeckung der Supraleitung in den Kupferoxiden glich der Entdeckung eines neuen Kontinents (wo weites Terrain zu erkunden war). Die Entdeckung der Supraleitung in MgB_2 hingegen ähnelt eher der einer entlegenen Insel eines wohlerforschten Archipels. Wir wissen derzeit nicht, ob MgB_2 das letzte Glied in dieser Kette ist oder ob uns noch weitere Überraschungen erwarten. ◁

Paul C. Canfield (oben) und **Sergey L. Bud'ko** forschen am Ames-Laboratorium des US-Energieministeriums in Iowa. Canfield ist außerdem als Professor für Physik und Astronomie an der Iowa State University tätig. Beide erforschen die Eigenschaften neuer Materialien.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Magnesium Diboride: better late than never. Von Paul C. Canfield und George W. Crabtree in: Physics today, Bd. 56, Heft 3, S. 34, März 2003

Superconductivity in MgB_2: electrons, phonons, and vortices. Von Wai Kwok, George W. Crabtree, Sergey L. Bud'ko und Paul C. Canfield (Hg.) in: Physica C, Bd. 385, Heft 1-2, März 2003

Magnesium Diboride: one year on. Von Paul C. Canfield und Sergey L. Bud'ko in: Physics World, Bd. 15, Heft 1, S. 29, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.